

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_ 密级\_\_\_\_\_

学号: 20720131150112

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

部分含铼三元系相图的实验研究

Experimental investigation of Phase Equilibria of Partial  
Ternary systems with Rhenium

杨 晓 锋

指导教师姓名: 刘 兴 军 教 授

专 业 名 称: 材 料 工 程

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2016 年 月

厦门大学博硕士论文摘要库

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘 要

镍基高温合金具有高强度、优良的耐热性和良好的耐腐蚀性，被广泛应用于航空航天、国防军事、核能等重要领域。迄今为止，镍基高温合金的添加元素达到了十多种，熔点高、原子半径大的元素如 Co, Re, Ru, Mo, W 等的添加，能起到很好的固溶强化作用，改善高温力学性能。然而高熔点元素的过量添加导致拓扑密排相的产生，降低镍基高温合金的疲劳寿命、塑性、韧性等力学性能。相图作为合金设计的基础，能够很好的指导镍基高温合金的成分设计。然而，由于 Re, Ru, W 等元素价格贵，熔点高，对其进行实验研究比较困难。截至目前，由 Co, Re, Ru, Mo, W 元素组成的三元系相图仍未发现研究报道。因此本研究对 Co, Re, Ru, Mo, W 五种元素组成的部分三元系相图进行了实验测定，所获得的相平衡信息将为镍基高温合金热力学数据库的建立和完善提供实验信息。本研究的主要内容如下：

(1) 本研究采用合金法，并结合电子探针、X 射线衍射等仪器实验测定了 Co-Re-X (X:W, Mo, Ru) 三元系在 1000℃、1100℃和 1200℃温度下全成分范围内的 9 个等温截面相图；研究结果表明，Re 在  $\text{Co}_7\text{W}_6$ 、 $\text{Co}_7\text{Mo}_6$  和 BCC 等相中均具有较大的固溶度；

(2) 本研究采用合金法，并结合电子探针、X 射线衍射等仪器实验测定了 W-Re-Mo(1000℃、1100℃和 1200℃)、W-Re-Ru(1100℃和 1200℃)三元系全成分范围内 5 个等温截面相图进行实验测定；研究结果表明，Ru 在 ReW 和 BCC 相中的固溶度较大；

(3) 对本实验室无铅焊料热力学数据库缺失的重要三元体系，采用合金法，并结合电子探针、X 射线衍射等仪器实验测定了 Ag-Cu-Sb 三元系在 300℃、500℃和 600℃温度时全成分范围内的等温截面相图，为新型无铅焊料的开发提供理论依据。

关键词：高温合金；相平衡；显微组织

厦门大学博硕士论文摘要库



## Abstract

The Ni-base superalloys are widely used in various fields, especially in the aerospace field due to their high strength, good heat resistance ability and corrosion resistance ability and so on. Till now, a dozen elements have been added to Ni-base superalloys. Element with high melt point and big atomic radius, such as Co, Re, Ru, Mo, W et al, have a good solution strengthening effect and improve its performance very well. As the basis of alloy design, phase diagram can guide the composition design of Ni-base superalloy. However, due to the high price and high melt point of Re, Ru, W, experimental investigation of these phase diagrams is of great difficulty, while the ternary systems related with Co, Re, Ru, Mo, W elements have not been reported. Hence, the present work intends to provide the experimental information corresponding to the phase equilibria in alloy system with Co, Re, Ru, Mo, W elements. The obtained data, referring to phase equilibria in the present work, will be the important constitution for establishing the thermodynamic database of the Ni-base superalloy. The detailed research contents are listed as follows:

(1) Nine isothermal sections, including the isothermal sections (1000°C, 1100°C and 1200°C) for Co-Re-X (X: W, Mo, Ru) ternary systems are determined by EPMA, XRD etc.; The results show that, the solid solubility is large for Re in  $\text{Co}_7\text{W}_6$ ,  $\text{Co}_7\text{Mo}_6$  and BCC phases.

(2) Experimental determination the phase equilibria of W-Re-Mo (1000°C, 1100°C and 1200°C) and W-Re-Ru (1000°C and 1100°C) ternary systems by EPMA, XRD etc. The results show that, the solid solubility is large for Re in ReW and BCC phases.

(3) Experimental determination the phase equilibria of Ag-Cu-Sb (300°C, 500°C and 600°C) ternary system by EPMA, XRD etc, which is still missing in current lead-free solder thermodynamic database, for completing our lead-free solder thermodynamics database and provide theoretical basis for the development of new lead-free solders.

Keywords: Superalloys; Phase equilibria; Microstructure

厦门大学博硕士论文摘要库

# 目录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 镍基高温合金的发展概况.....	1
1.2 合金化对镍基高温合金性能的影响.....	5
1.2.1 Co 元素在镍基高温合金的作用.....	5
1.2.2 Re 元素在镍基高温合金的作用.....	6
1.2.3 Mo 元素在镍基高温合金的作用.....	7
1.2.4 Ru 元素在镍基高温合金的作用.....	8
1.2.5 W 元素在镍基高温合金的作用.....	11
1.3 相图在高温合金开发中的应用.....	11
1.4 研究目的及研究内容.....	15
参考文献.....	16
第二章 样品制备与实验方法.....	21
2.1 合金样品的制备.....	21
2.2 热处理工艺.....	22
2.3 分析用合金样品的制备.....	22
2.4 实验方法.....	22
2.4.1 微观组织和成分分析.....	22
2.4.2 晶体结构测定.....	23
参考文献.....	24
第三章 Co-Re-X(X: W, Mo, Ru)各三元系相图的实验测定.....	25
3.1 Co-Re-W 三元系的实验相图信息.....	25
3.1.1 基础二元系.....	25
3.1.2 Co-Re-W 三元系相图的研究现状.....	28
3.1.3 Co-Re-W 三元系相图的实验测定.....	30
3.2 Co-Re-Mo 三元系的实验相图信息.....	43

3.2.1 基础二元系 .....	43
3.2.2 Co-Re-Mo 三元系相图的研究现状.....	45
3.2.3 Co-Re-Mo 三元系相图的实验测定.....	47
<b>3.3 Co-Re-Ru 三元系的实验相图信息 .....</b>	<b>59</b>
3.3.1 基础二元系 .....	59
3.3.2 Co-Re-Ru 三元系相图的研究现状.....	61
3.3.3 Co-Re-Ru 三元系相图的实验测定.....	63
<b>3.4 本章小结.....</b>	<b>70</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>71</b>
<b>第四章 W-Re-X(X: Mo, Ru)各三元系相图的实验测定 .....</b>	<b>76</b>
<b>4.1 W-Re-Mo 三元系的实验相图信息 .....</b>	<b>76</b>
4.1.1 基础二元系 .....	76
4.1.2 W-Re-Mo 三元系相图的研究现状.....	78
4.1.3 W-Re-Mo 三元系相平衡的实验测定.....	80
<b>4.2 W-Re-Ru 三元系的实验相图信息 .....</b>	<b>91</b>
4.2.1 基础二元系 .....	91
4.2.2 W-Re-Ru 三元系相图的研究现状.....	92
4.2.3 W-Re-Ru 三元系相图的实验测定.....	94
<b>4.3 本章小结.....</b>	<b>101</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>102</b>
<b>第五章 Ag-Cu-Sb 三元系相图的实验测定 .....</b>	<b>105</b>
<b>5.1 Ag-Cu-Sb 三元系的实验相图信息 .....</b>	<b>106</b>
5.1.1 基础二元系 .....	106
5.1.2 Ag-Cu-Sb 三元系相平衡的实验测定.....	109
<b>5.2 本章小结.....</b>	<b>120</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>121</b>
<b>第六章 总结 .....</b>	<b>126</b>
<b>附录：电流保险丝钎焊焊锡溢出的解决方法 .....</b>	<b>127</b>

7.1 引言.....	127
7.2 一种解决电流保险丝焊锡溢出的工艺方法.....	128
致 谢.....	133
攻读硕士学位期间的科研成果.....	134

厦门大学博士论文摘要库

厦门大学博硕士论文摘要库

# CONTENTS

<b>Abstract(Chinese).....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>CHAPTER 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 The development of supperalloys.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 The research progress of various alloying elements.....</b>	<b>5</b>
1.2.1 The effect of Co element to nickle-base superalloy.....	5
1.2.2 The effect of Re element to nickle-base superalloy.....	6
1.2.3 The effect of Mo element to nickle-base superalloy.....	7
1.2.4 The effect of Ru element to nickle-base superalloy.....	8
1.2.5 The effect of W element to nickle-base superalloy.....	11
<b>1.3 The application of phase diagram in developing supperalloy .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Research objectives and main contents.....</b>	<b>15</b>
<b>Reference.....</b>	<b>16</b>
<b>CHAPTER 2 Sample preparations and experimental methods.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Preparation of alloys.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Heat-treatments.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Preparation of the sample for anlyses.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Experimental procedures.....</b>	<b>22</b>
2.4.1 Microstructure and composition analyses.....	22
2.4.2 Crystal structure analyses.....	23
<b>References.....</b>	<b>24</b>
<b>CHAPTER 3 Experimental determination of Co-Re-X(X: W, Mo, Ru)</b>	
<b>ternary systems.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Experimental information of Co-Re-W ternary system.....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Phase equilibria of binary systems.....	25
3.1.2 Reaearch status of the Co-Re-W ternary system.....	28
3.1.3 Experimental determination of Co-Re-W ternary system.....	30
<b>3.2 Experimental information of Co-Re- Mo ternary system.....</b>	<b>42</b>
3.2.1 Phase equilibria of binary systems.....	42
3.2.2 Reaearch status of the Co-Re-Mo ternary system.....	44
3.2.3 Experimental determination of Co-Re-W ternary system.....	46

<b>3.3 Experimental information of Co-Re-Ru ternary system.....</b>	<b>58</b>
3.3.1 Phase equilibria of binary systems.....	58
3.3.2 Reaearch status of the Co-Re-Ru ternary system.....	60
3.3.3 Experimental determination of Co-Re-Ru ternary system.....	62
<b>3.4 Summary.....</b>	<b>69</b>
<b>References.....</b>	<b>70</b>
<b>CHAPTER 4 Experimental determination of W-Re-X(X:Mo,Ru)</b>	
<b>ternary systems.....</b>	<b>75</b>
<b>4.1 Experimental information of W-Re-Mo ternary system.....</b>	<b>75</b>
4.1.1 Phase equilibria of binary systems.....	75
4.1.2 Reaearch status of the W-Re-Mo ternary system.....	77
4.1.3 Experimental determination of W-Re-Mo ternary system.....	9
<b>4.2 Experimental information of W-Re-Ru ternary system.....</b>	<b>90</b>
4.2.1 Phase equilibria of binary systems.....	90
4.2.2 Reaearch status of the W-Re-Ru ternary system.....	91
4.2.3Experimental determination of W-Re-Ru ternary system.....	93
<b>4.3 Summary.....</b>	<b>100</b>
<b>References.....</b>	<b>101</b>
<b>CHAPTER 5 Experimental determination of Ag-Cu-Sb ternary</b>	
<b>systems.....</b>	<b>104</b>
<b>5.1 Experimental information of W-Re-Ru ternary system.....</b>	<b>105</b>
5.1.1 Phase equilibria of binary systems.....	105
5.1.2 Experimental determination of Ag-Cu-Sb ternarySystem.....	108
<b>5.2 Summary.....</b>	<b>119</b>
<b>References.....</b>	<b>120</b>
<b>CHAPTER 6 Conclusions.....</b>	<b>125</b>
<b>APPENDIX: The Solution of current fuse solder overflow.....</b>	<b>126</b>
<b>7.1 Introduction.....</b>	<b>126</b>
<b>7.2 A Process method to the current fuse solder overflow.....</b>	<b>127</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>132</b>
<b>Publications.....</b>	<b>133</b>



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.